基于NB-IoT网络的兔舍环境实时监测系统

秦英栋[1,2]，贾文珅[2*]

（1. 北京农学院 计算机与信息工程学院，北京 102206；2. 北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所，北京 100097）

摘　要：为满足兔舍环境监测调控需求，同时摆脱传统布线网络局限性，缩减网络资费、电路元件和控制系统成本，本研究提出一种基于窄带物联网（Narrow Band Internet of Things，NB-IoT）的兔舍环境实时监测系统。系统基于Arduino开发板，使用移远BC260Y模块与消息队列遥测传输协议（Message Queuing Telemetry Transport，MQTT）实现网络连接，利用SGP30、MQ137、5516光敏电阻传感器等多种传感器实现兔舍内部声、光、水、温、气五方面实时监测。数据在本地、云端存储的同时，系统可根据阈值报警，协助创造兔的最佳生存环境。研究中对比了NB-IoT网络与Wi-Fi、LoRa等其他网络的异同，根据物联网三层架构详细介绍了系统搭建技术与过程，并系统分析了元器件价格，经核算，整机成本不超过400元。设备在空舍测试中，检测到CO_2浓度为420～440 ppm；MQ系列传感模组电压比值稳定于1；温度处于22～24 ℃；湿度上下波动10%；日光灯亮灭引起电压差2.6 V。进行了系统的网络与能耗测试，通过不同时间、场地、网络连接方式的对比，验证了本系统传输稳定可靠，能耗合理。系统使用MQTT通信协议的NB-IoT网络，平均每秒消息处理量（Transactions Per Second，TPS）为0.57，每分钟收发34.2条，上下浮动1条。系统运行时，电压约为12.5 V，电流约为0.42 A，平均功率为5.3 W。发生通信时，没有产生额外功耗，适用于实际养殖生产。本研究可为偏远或较大规模的养殖监测设备选取提供设备成本与网络选择参考价值。

关键词：窄带物联网；兔舍；环境监测；数字农业；低成本；物联网；Arduino；MQTT

中图分类号：TN929.5;S829.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202211008

引用格式：秦英栋, 贾文珅. 基于NB-IoT网络的兔舍环境实时监测系统[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(1): 155-165.

QIN Yingdong, JIA Wenshen. Real-time monitoring system for rabbit house environment based on NB-IoT network[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(1): 155-165.

1　引　言

根据联合国粮食与农业组织数据，中国是世界上产兔第一的国家。2020年，全球兔（家兔与野兔）存量约1.93亿只，中国的兔存量约为1.18亿只，约占61.1%。全球冷鲜兔肉产量约893,631吨，中国冷鲜肉兔产量为456,552吨，约占51.1%。兔不同于其他畜禽，对生长环境稳定要求更高，在饲养过程中，为确保兔顺利生长，需要保证环境因素相对稳定[1]，因此，兔舍环境信息监测非常重要。

窄带物联网（Narrow Band Internet of Things，NB-IoT）是一种针对mMTC（Massive Machine Type Communication）场景设计的低功耗广域网技术，可处理大规模低功耗连接并提供超大覆盖范围，同时具有深度室内穿透性能[2]。NB-IoT依靠电信运营商的蜂窝移动网络，原理上与4G/5G类似，在有电信运营商基站的地方就可以收到NB-IoT网络信号，虽然峰值网速不高，但资费极低，每年10元左右，本质上是应对物联网发展需求的一种衍化。近年来，NB-IoT不断与农业相结合，

收稿日期：2022-11-21

基金项目：河北省重点研发计划（21375501D）；北京市农林科学院科技创新能力建设专项（KJCX20230438）；北京农学院学位与研究生教育改革与发展项目（2002YJS034）；国家自然科学基金（31801634）；北京市农林科学院财政追加专项（CZZJ202102）

作者简介：秦英栋，硕士研究生，研究方向为农业物联网。E-mail：dave7685567@qq.com

*通信作者：贾文珅，博士，副研究员，研究方向为农产品安全快检方法。E-mail：jiawenshen@163.com

应用在多个农业监测领域，并逐步完善了设备监测维度、运用逻辑和复杂程度。Ye等[3]设计了基于NB-IoT的智能农业温室植物无线网络检测系统，实现温室温湿度、土壤湿度、光照强度的监测。Feng等[4]针对精准农业应用，通过实验验证了NB-loT、LoRa、ZigBee三种无线传感器网络应用于精准农业的可行性。Liopa-tsakalidi[5]设计了一种基于NB-IoT的智能水灌溉系统，通过希腊某葡萄园内节点获取地下20 cm处土壤湿度与温湿度，将需水信息上报云并后台基础设备。刘振语[6]提出了一种基于NB-IoT的温室大棚监控系统并通过网页端控制，系统实现了对温室内土壤、水箱等信息进行监测。Mezei等[7]通过温度、风速、降雨量、叶片湿度等信息研究了孢子囊菌的传播，提出了基于NB-IoT和能量采集技术的葡萄霜预警系统。张净等[8]针对水培生菜生长过程，设计并试验一个基于NB-IoT的水培智能监控系统，对水培营养液的水质参数进行及时准确监测。Huan等[9]开发了基于NB-IoT的养殖池塘水质监测系统，实现了多传感器处理器环境信息的存储与远程采集，以及养殖池塘的智能控制和集中管理。梁裕巧等[10]提出一种基于NB-IoT的花椒生长环境监测系统，对比了四个节点在与基站不同距离下的网络情况，在10 km以内平均丢包率不超过35%；通信距离超过10 km时，平均丢包率不超过85%。Popli等[11]针对农业应用场景，利用了一个小型蜂窝接入点提高了NB-IoT性能的能源效率最大化问题，仿真结果表明，提高了NB-IoT传感器能效39.8%。聂珲和陈海峰[12]结合NB-IoT技术和传感器技术构建的环境监测系统，对采集的各项环境因子进行了多传感器数据融合研究。目前农业的环监设备中NB-IoT网络的推广还并不完备，在兔舍的相关研究发展中，尚未有研究将NB-IoT应用于兔舍相关监测设备中。

为实现兔养殖的环境数字化，本研究着力于扩展监测维度，改善应用成本与网络形式，从实际兔舍监测试验、舍内应用NB-IoT网络稳定性、设备功耗出发验证应用的可行性。设备基于传感器技术和NB-IoT传输技术开发，通过各项传感器对环境的响应程度，将环境信息数据化，通过轻量化的NB-IoT网络针对需求改善网络形式，形成了一套低成本兔舍环境监测系统。设备主控基于Arduino开发板，利用MQ136、MQ137、SGP30、声音传感器和光敏电阻传感器多种环境信息传感器，采集的数据支持本地保存、上传云端。该研究为传统兔舍转型与农业设备网络选型提供设备参考，以期加快推进兔舍环境数字化进程。

2 系统设计

2.1 环境因子与传感器选择

系统传感器模组依据兔的生理习性和监测需求相关性进行选择，主要包括DHT11、MQ136、MQ137、SGP30、声音传感器和光敏电阻传感器多种环境信息传感器，共6种。

（1）温湿度传感器。舍内湿度一般要求在60%~65%之间，过高的湿度会导致舍内冰原微生物的快速繁殖进而引起兔的疾病。兔的生长要求环境温度一般保持在15~25 ℃之间。由于兔的生长阶段不同，最适宜温度段也不同。2~4周龄仔兔要求兔舍温度为20~30 ℃，生长兔和成年兔的兔舍内温度以15~20 ℃为宜[13]。温湿度控制上，选用DHT11温湿度传感器。综合燃料费用、兔舍面积，以及兔的生长周期等条件，兔舍温度阈值初步考虑在18~22 ℃。

（2）气体传感器。兔舍内部常常伴有NH_3、H_2S这些有毒有害气体[14]。动物呼吸作用产生的CO_2也为重要气体指标之一。由于仅需对兔舍复杂的气体环境进行数值域的综合判断，不需要做物质组成成分精确检测，便可以协助生产判断舍内空气情况。而MQ137、MQ136此类传感器对NH_3、H_2S敏感的同时，因具有交叉敏感性，可以对多种其他相似代谢产生物质产生反应，进而促进电压升高，比电化学传感器获得更为明显的电压信号。在实际中更容易监测到兔的代谢气体混合物的变化，达到判断空气环境的目的。本研究选用MQ137NH_3传感器、MQ136 H_2S传感器和SGP30 CO_2传感器作为气体传感器。

（3）声音传感器。兔子胆小，怕惊吓，兔舍周围环境应保持安静[15]，所以需要借助声音传感器检测声音大小作为监测的标准。Sound Sensor V1.5

传感器经小型麦克采集声音信号通过LM386处理放大功率，令单片机读取对应变化的电压值。

（4）光敏电阻传感器。光照会对兔子的行为产生影响[16]，因此选用5516光敏电阻传感器获取光照强度对应的电压值，根据光强电阻对应发生变化，从而单片机获取到模拟电压。

综上所述，本设备监测的环境因子为温度、湿度、CO_2浓度、H_2S浓度、NH_3浓度、光照强度，以及异常声响。

2.2 网络类型选择

目前主流网络技术包括NB-IoT、LoRa、Wi-Fi、蓝牙（Bluetooth），以及4G/5G等。各项技术优势对比如表1所示。

表1 各项网络技术优势对比

Table 1 Comparison of networking technologies

类目	NB-IoT	LoRa	Wi-Fi	Bluetooth	4G/5G
费用经济性	√			√	
信号覆盖度	√	√			√
网速			√		√
易用性	√				√

注：图中“√”表示在该比较维度具有显著优势

由于兔舍环境监测网络需求极度轻量化，不追求数据传输的量与速度，在兔舍室内密集养殖中，气体处于弥漫状态，不会局部突发性增高，因此仅需少量设备便可完成大面积监测。同时考虑到经济性等因素，本研究采用NB-IoT网络进行数据传输。此外，NB-IoT不仅能够解决网络设备的布线与硬件问题，且拥有更低的资费，微量数据传递、连接效果同样可靠。

2.3 系统架构

系统整体采取物联网三层架构模式（图1），包括感知层、网络层和应用层，主要在NB-IoT网络环境下实现低能耗、低成本、一定规模的兔舍内各环境因子的实时数据采集与远程监控，协调控制环境因子。感知层主要为利用多种模拟信号传感器，实现对于兔舍内声、光、水、温、气五方面综合实时数据采集。网络层对于多种网络连接形式，采用能耗低、资费低、易部署的NB-IoT网络，通过MQTT协议，上传数据到阿里云平台，进行数据展示与处理。为达到相对理想生长环境，采取实时数据保存、上传、监控、报警的方式。系统硬件架构如图2所示。

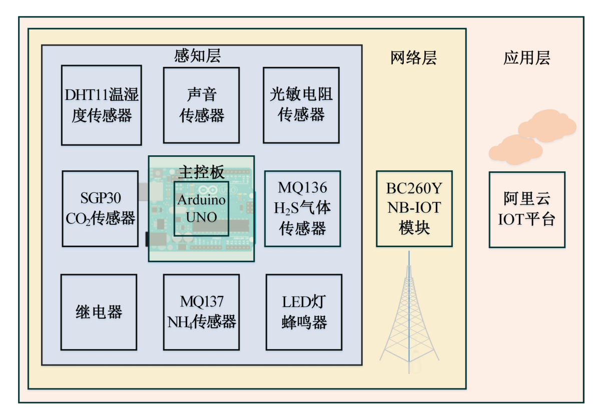


图1 兔舍环境监测系统架构设计图

Fig. 1 Design drawing of rabbit house environment monitoring system architecture

2.3.1 Arduino Uno主控板

主控板采用Arduino Uno作为整个系统的电路控制。Arduino拥有极大的开发者群体与社区，并具有开源与经济实惠的特点。Arduino Uno主控板（图3）上使用ATMEGA328P-AU控制芯片，并拥有IIC、SPI、数字引脚与模拟引脚，通过板载的10位数模转换器，可以将传感器采集到的模拟信号转换成数字信号。

2.3.2 感知层设计

感知层利用所选择的7种传感器构成特异化的兔舍内环境传感阵列。并根据感知结果通过继电器进行调控兔舍内部控温控风设备。MQ136、MQ137、SGP30、声音传感器和光敏电阻传感器皆使用模拟电压进行通信，通过将传感器的电阻变化通过测试电路转化为电压变化，再通过Arduino的10位数模转换器将电压模拟值转化为0~1024的数值，对应传感器0~5 V的电压输出。SGP30单一芯片上集成了4个金属氧化物传感器，相对稳定。使用了IIC总线型通信和Uno主控板上SCL和SDA引脚。温湿度传感器DHT11同样采取总线型通信，但是其采用的是单一总线型，即将时钟与信号通过一条信号线传输，单一总线型遵循Wire协议。继电器则通过数字接口进行连接。针对环境信息的变化触发继电器，可以控制周边电路的通断，以达到控

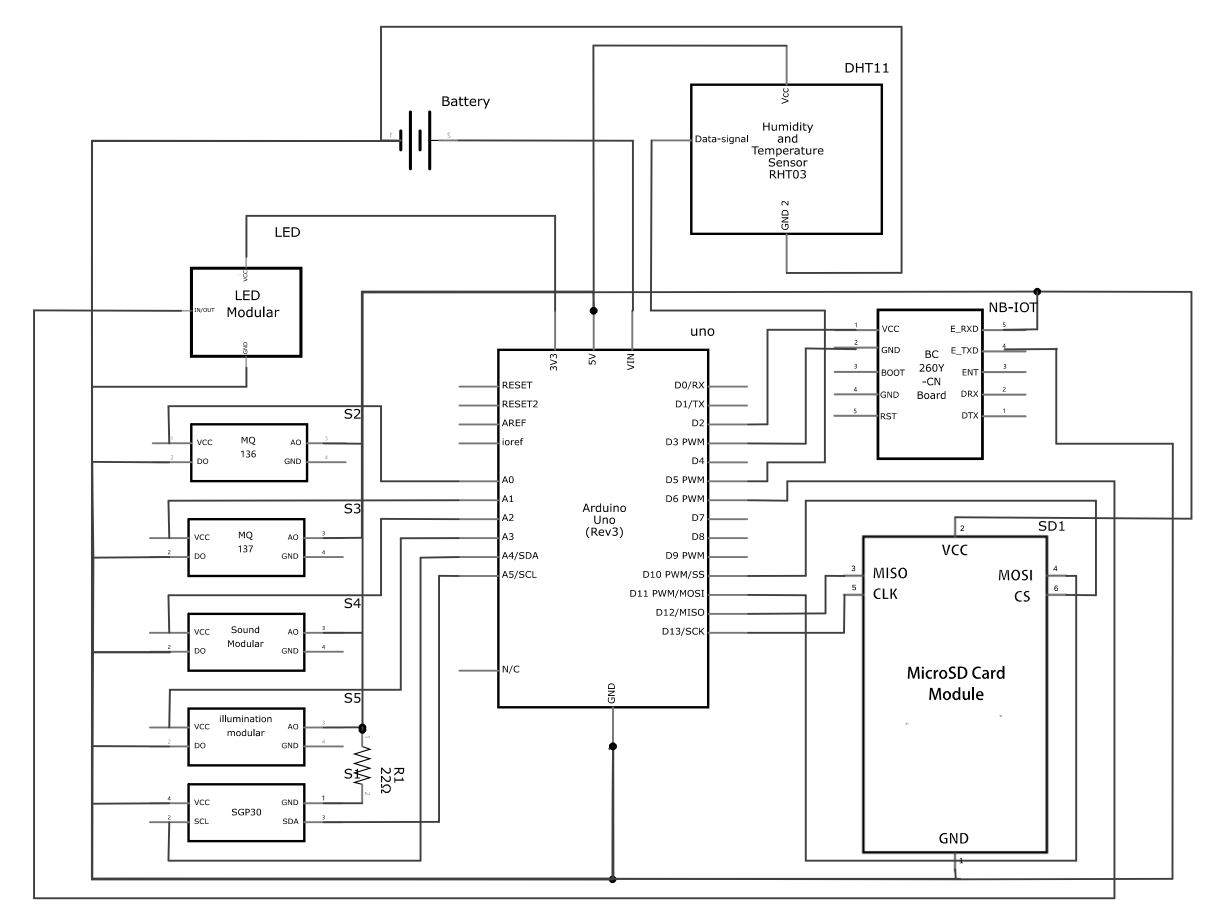


图2 兔舍环境监测系统接线原理图

Fig. 2 Wiring schematic of rabbit house environment monitoring system

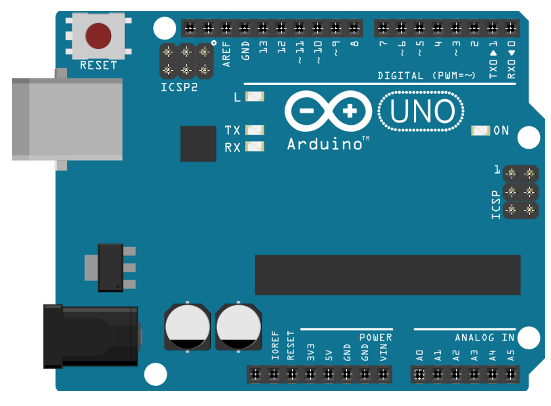


图3 Arduino Uno主控板

Fig. 3 The main control board of Arduino Uno

制环境调节设备的目的，另外还包括蜂鸣器、LED灯以达到警示作用。设备内嵌SD卡保存本地数据。通过SPI引脚连接SD卡模块与主控板，通过SD函数包，实现对于字符串的逗号间隔格式的存储。由于Arduino并不支持csv格式文件直接存储，利用字符串的逗号间隔，先保存为txt格式文件，再修改后缀变为csv格式。

2.3.3 网络层设计

设备采用移远的BC260Y通信模块（图4）进行NB-IoT网络通信，此模块与主控板之间使用串口通信，对Arduino进行软串口的自定义，实现利用BC260Y的RXD与TXD引脚的串口通信，用代码预置AT指令，调用云平台封装好的MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）通信协议最终实现极轻量化的数据连接。



（a）模块正面　　（b）模块背面

图4 NB-IoT通信模块BC260Y

Fig. 4 NB-IoT communication module BC260Y

BC260Y通信模块主要是使用AT指令与服务器进行连接的。AT指令伪代码：

"AT+CPIN？"，"+CPIN：READY"//对物联卡进行识别

"AT+CGATT？"，"+CGATT：1"//检测设备是否正常

"AT+QMTCLOSE=0"//关闭上一次socekt连接

"at+qmtcfg=\"aliauth\"，0，\"h7o38AmFQUj\"，\"XXXXXXX\"，\"a88908fe381389ecf9f79d2a187415cf\""//三元素配置（三元素是指云平台所提供的设备识别信息）

"AT+QMTOPEN=0，\"139.196.135.135\"，1883"，"+QMTOPEN：0，0"//连接目标服务器的IP与端口号

"AT+QMTCONN=0，\"clientExample\""，"+QMTCONN：0，0，0"//建立与阿里云服务器的IP和端口连接

BC260Y内部封装了MQTT协议，通过调用MQTT协议的接口，利用AT指令，使用MQTT通讯协议，将BC260Y模块通过运营商基站连接至阿里云平台。

2.3.4 应用层设计

阿里云物联网平台是国内开发者常用的物联网平台之一，该平台提供了免费的测试实例与商用企业实例。通过在平台上注册设备号等信息，将所有认证信息嵌入开发板中。并在云平台定义各项物模型（图5）以传入数据。

平台读取要求JSON数据格式，因此需建立

功能名称（全部）	标识符	数据类型	数据定义
硫化氢 自定义	H2S	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 500
氨气 自定义	NH3	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 1000
空气有机化合物浓度 自定义	tvco	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 2000
当前音量 自定义	sound	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 100
二氧化碳 可选	co2	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 4500
光照强度 可选	LightLux	float (单精度浮点型)	取值范围：0 ~ 10000
当前湿度 可选	CurrentHumidity	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 100
当前温度 自定义	CurrentTemperature	int32 (整数型)	取值范围：0 ~ 100

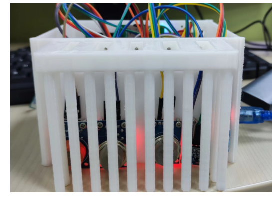
图5 阿里云平台本研究模型定义

Fig. 5 Model definition on Alibaba cloud platform

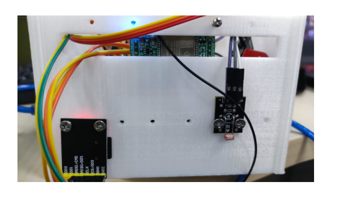
JSON格式模板。在代码阶段，用C语言的sprintf函数将各个传输数据发送到数据格式与JSON相同的字符数组中，最终形成JSON数据包。在云平台进行物模型的定义与编辑以后就可以正常接收到数据了，可以实时查看与生成图像等。

2.4 监测系统组装

将前期开发完成的电路放入自主设计的外壳中。将各传感器加装在设备外壳的螺丝孔，并将BC-260Y模块放置在信号良好位置引出天线。使用防触碰保护罩保护传感器，以免发生意外干扰传感器工作，如图6所示。



(a)系统正面



(b)系统背面

图6 兔舍环境监测系统组装图

Fig. 6 Assembly drawing of the rabbit house environment monitoring system

2.5 系统成本分析

2.5.1 单项成本分析

为满足实际推广的成本需求，调研并对比分析主控设备与其他监测设备器件成本。Raspberry Pi（树莓派）对开发者来说非常受欢迎，也产生了不少应用于农业场景的设备[17-19]。但目前Raspberry Pi 4B电商平台售价在900元人民币左右，对应用于发展中国家的农业环境监测来说，价格偏高。Arduino因为其低成本（160～175元），被更多选择使用在小型嵌入式设备当中[20]。Arduino虽然在开发板角度性能较弱，但是接口与功能丰富，且能完成一些简单的程序逻辑，价格低廉还方便后期加装改进。Arduino利用软串口实现上网功能，利用云平台实现远程端数据展示，也避免使用Raspberry Pi带来的高额的成本费用。本设备所用的Arduino Uno目前在国内电商平台单价在120元左右。

兔舍养殖的环境监测不需要ppb级（ug/L）精准监测，而是仅需确定环境稳定的大致范围。因

此，基础的半导体传感器便可完成监测任务。整个感知层所需传感器既要考虑养殖实际需求，又本着农业设备推广的低价原则。由电商平台可知零售成本，MQ136约为45元，MQ137约为55元，SGP30约为40元，其他元件总计约为35元，经核算传感器总价控制在175元以内。

物联网常用网络大概成本如表2所示。本设备使用NB-IoT网络，最大的成本节省来源于网络资费，因为程序每运行一次仅发送了一个JSON数据格式，本设备以40次/min上传的情况下，完整运行24 h，也仅有几百kB的流量消耗。如此轻量级的数据上报，将会节约很大的网络成本费用。BC260Y通信模块单价85元左右。使用中国移动的物联网卡，每年300 M，仅用于采集数据的上传，资费每年10元左右。

表2　物联网常用网络大概成本

Table 2 Aapproximate cost of commonly used IoT network

类目	NB-IoT	LoRa	Wi-Fi	4G/5G
网络资费/(元·年$^{-1}$)	10	无	350	100
通信模块费用/(元·个$^{-1}$)	80	40	10	60
网关或路由设备费用/(元·台$^{-1}$)	无	6000	100	无

本研究所提供的兔舍内监测设备从多方面对兔舍内部环境因子进行监测，提升了一定的监测维度，并依靠选择符合监测需求的电路元件，减少过剩性能进而降低硬件成本；通过选择资费更低的NB-IoT网络形式缩减成本；脱离上位机，单独使用也节省了其他布线与设备费用开销。相对于其他研究，本设备具有一定成本优势。兔舍的环境监测系统研究侧重不同成本费用也不相同（表3）。

表3　不同研究中兔舍环境监测设备

Table 3 Environmental monitoring equipment for rabbit house in different studies

类目	本研究	文献[21]	文献[22]	文献[23]
所使用的网络类型	NB-IoT	2G/3G	离线	离线
监测指标	温湿度、光照、声音、CO_2、NH_3、H_2S	温湿度、NH_3	四种环境参数	温湿度、CO_2、NH_4
传感器或设备估算费用	不超过400元独立运行	上百元且需要一台上位机电脑	需要电脑计算	上千元
研究的特色	成本与网络改进	国内研究的雏形	传感器数据融合	基于模糊推理实现环境调控

2.5.2　总体成本分析

核心控制板零售价约为120元，传感器部分约为175元，网络模块约为85元，网络资费分为物联网卡套餐与云平台使用费用，套餐费约为每年10元。目前在文献少有涉及商业盈利问题，阿里云物联网平台公共实例可以免费试用50台设备，根据阿里云官网文档给出，商用实例每年1.4万元，可以同时在线1万个设备，单设备每年使用云平台成本1.4元。云平台使用开发方便无论是对于小范围实验或者大型企业推广都存在一定的成本优势。

经核算该套监测系统电路元件成本总计不超过400元。

3　系统部署与测试

3.1　系统部署

NB-IoT的信号往往在室外环境比较可靠，经过环境遮挡或信号干扰则可能会影响其稳定性。兔舍一般地处空旷的市郊，在电信运营商的基站覆盖范围内，且没有建筑与信号遮挡。一个养兔场一般会有多个兔舍，需要多个兔舍环境监测设备以服务整个养兔场。

监测系统搭建完毕后，在山东省青岛市某养兔场实地进行网络测试。兔舍内部封闭，使用三台风机进行不间断内外气体交换，室内气温约为29 ℃，湿度约为80%，与室外温湿度接近。将设备布置在兔舍周边架位上（如图7所示），加装高度上与兔生活环境相近，能较为合理获取环境参数。尽量选择避风位置，有效减少传感器噪声。实验场景兔舍平面图如图8所示。设备在a1与a2点位经过测试，传感器运行较为稳定，监测范围相对覆盖大。a1点受到风机影响更小，较a2点位更好。



(a)舍内实际布设场景模拟



(b)舍内考察

图7 青岛市某养兔场实验实际场地选取布设位置

Fig. 7 The selection and layout of experimental sites in a rabbit house in Qingdao

3.2 网络与信号测试

2022年6月某日进行设备实地网络测试。兔舍地处市郊，建筑为保温的棚室结构，数据源于阿里云平台后台原始数据截图。

在6月某日的14:20～15:20的1小时网络通信测试中，基本保持了相对稳定的数值（图9），平均消息量为34.2条/min，上下浮动1条。即平均每秒消息处理量（Transactions Per Second，TPS）为0.57，浮动0.06。

2022年11月某日在冬季室内又进行了信号测试。本次测试来源于城市中心的室内环境，数据来源于阿里云平台后台原始数据。图10中纵坐标为消息上下行TPS，每分钟为一周期，计算方式为消息条数除以60 s，在接近一小时的测试中，基本保持在39次/min消息上报，发送消息的时间本身是由程序运行一轮决定。图11为实时MQTT协议上报，其中出现三次波动，图像显示为先下降，后上升，具体原因是发生了网络延迟，有5条消息延迟到下一分钟才上报成功，总体在室内环境下较为稳定。

根据阿里云平台所展示数据来看，NB-IoT网络在市郊拥有比较可靠的稳定性，满足了监控兔舍环境等农业生产的需求。就算在封闭的兔舍内部，信号稳定性依然优于信号干扰与建筑遮挡的市中心。

3.3 功耗测试

对于监测设备来说，功耗要满足长期运行的需求。在冬季正常室温环境下对设备进行功耗测试，使用T18型电能表（炬为科技），可对整个设备的电压、电流、功率进行实时检测（图12）。通电后运行数小时，读数相对稳定，该测试对比了Wi-Fi通讯和NB-IoT通讯的两种方式。除两种通讯模块不同外，均使用本研究自制的环境监测设备并连续巡行测试。

Wi-Fi传输在原有NB-IoT通信进行修改，将BC260Y通信模块拆下。使用总线型通信绑定上下位机，利用IIC通信，与ESP8266开发板建立主从关系，通过ESP8266模块实现Wi-Fi数据的上传。为保证一致性，两次测试中上报的数据皆为相同大小格式的JSON数据包，其内皆包含了多种传感器的电压数值。

两者使用相同的12 V锂电池供电长时间运行。使用NB-IoT网络的监测设备电流约为0.42 A，功率约为5.3 W，每日用电0.127度；使用Wi-Fi网络的监测设备电流约为0.38 A，功率约为4.8 W，每日用电0.115度。两种通信模块功率差距约为0.5 W，基本等于单个金属氧化物传感器功率（MQ136、MQ137实测单个传感器功率约为0.6 W）。如表4所示，两种通信模块差距不大。而将NB模块停止上报数据以后，功率并未发生改变，所以即为BC260Y模块未进入节电模式（Power Saving Mode,

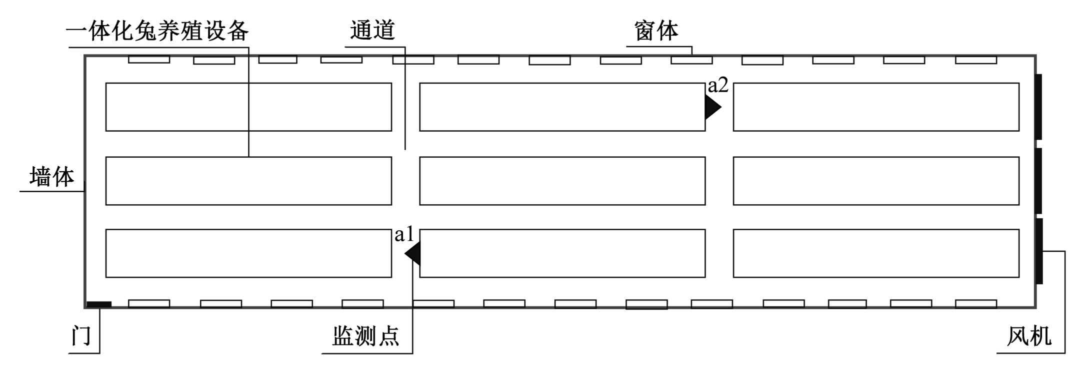


图8 用于系统测试的兔舍平面图

Fig. 8 The rabbit house floor plan for system testing

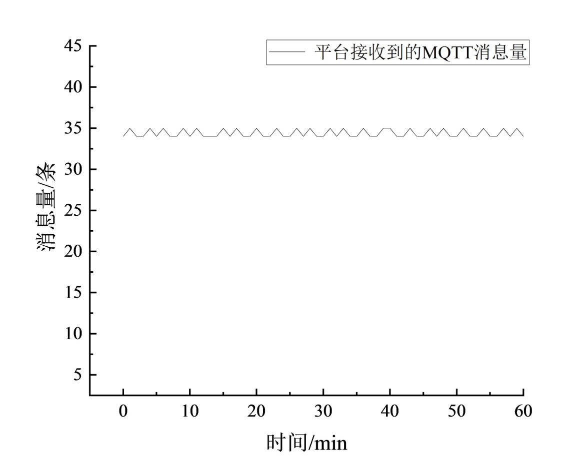


图 9 兔场接收到的 MQTT 消息量

Fig. 9 The amount of MQTT messages received by rabbit house

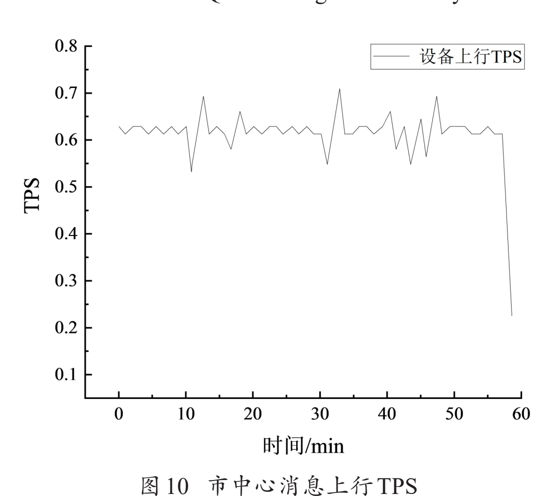


图 10 市中心消息上行 TPS

Fig. 10 News uplink TPS in downtown

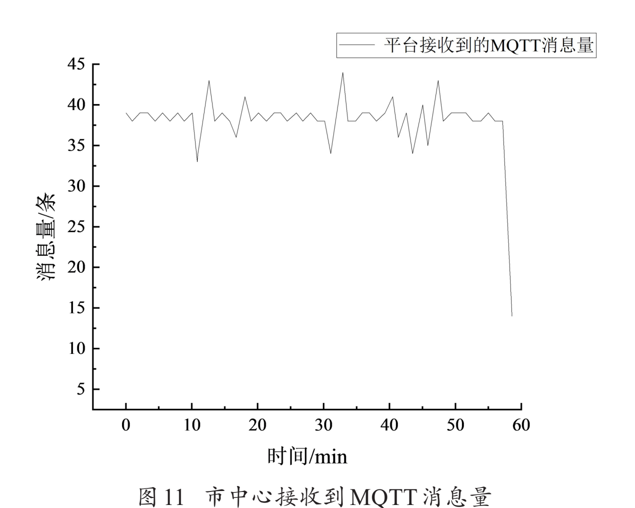


图 11 市中心接收到 MQTT 消息量

Fig. 11 Volume of MQTT messages received by the downtown area

PSM），远距离通信所产生的射频功率，也说明NB-IoT 网络所产生的通信的功率消耗几乎可以忽略不计，Wi-Fi模块通信时电流增加10～15 mA。



（a）使用 NB-IoT 模块的功耗　（b）使用 Wi-Fi 模块的功耗

图 12 使用电能表检测相同设备的不同网络模块

Fig. 12 Use electricity meters to detect the same devices in different network modules

表 4 不同网络模块功耗对比

Table 4 Power consumption contrastive of different network modules

类目	电流/A	电压/V	功率/W
使用NB-IoT模块的设备	0.42	12.5	5.3
使用Wi-Fi模块的设备	0.38	12.5	4.8

3.4 实际监测数据

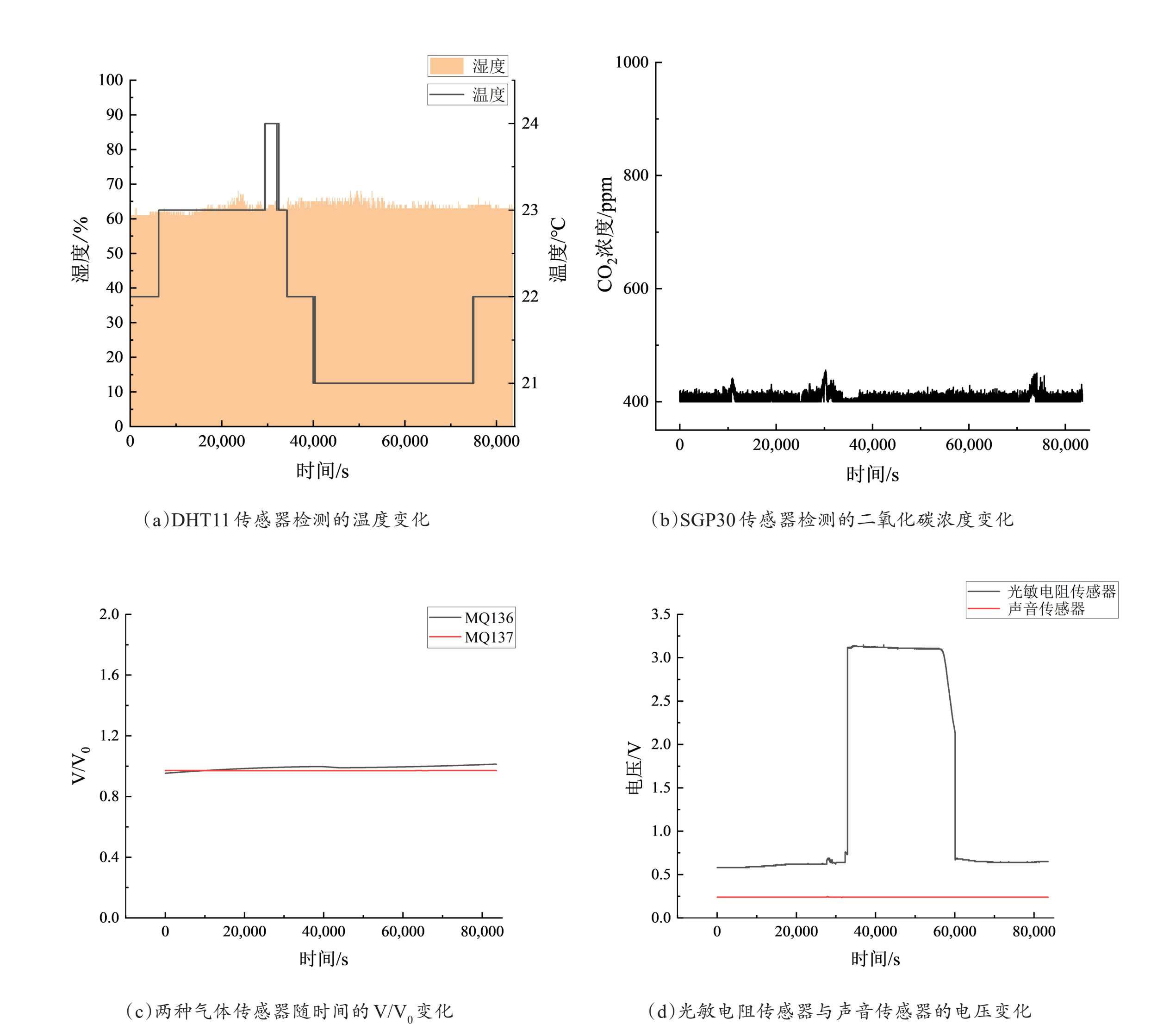
图13表示了2022年11月某日的空兔舍的24小时数据采集实验，监测了温度、湿度、气体状况、照度、声音的数据，整体数据较为平稳。检测时间为该日上午至次日上午。

图 13（a）中展示了兔舍温度在 22～24 ℃范围，在 40,000～75,000 s 该区间内最低。另外，该图中也展示了湿度的变化，上下浮动10%左右。

图 13（b）表示 CO_2 的实时检测值，在 420～440 ppm浓度区间内较为稳定。

MQ136和MQ137的电压变化表示了 H_2S 和 NH_3 的浓度变化，传感器模组输出电压与浓度成正相关关系。图 13（c）表示 MQ136 和 MQ137 传感器的 V/V_0 值，其中 V_0 表示了洁净空气中的传感器模组电压，V 表示了当前电压。设备通过电压比值的监测实现气体浓度的大致监测。由于监测环境中缺少敏感气体，因此曲线波动不明显。该图中 V/V_0 基本处于相对稳定值1附近，符合监测要求。

从图 13（d）中看出，声音传感器电压无波动，环境基本处于安静状态，无异响。其次，由于该光敏电阻传感器与光线响应成反比，30,000～60,000 s之间为深夜，实验场地关灯。当黎明来临电压值缓



(a)DHT11传感器检测的温度变化

(b)SGP30传感器检测的二氧化碳浓度变化

(c)两种气体传感器随时间的 V/V_0 变化

(d)光敏电阻传感器与声音传感器的电压变化

图13 空兔舍24小时数据采集

Fig. 13 Empty house 24 hours data acquisition

慢下降，然后日光灯亮起，又回到0.6 V左右。

4 结 论

为拓展兔养殖环境监测的网络可靠性、实地布设实用性、监测因子完整性，本研究设计了一种基于NB-IoT的低成本多环境因子兔舍环境监测系统并进行了并对系统在实际兔舍应用中多项指标进行了测试，主要结论如下。

（1）监测系统采用Arduino Uno主控板，物理层、网络层、应用层三层物联网结构设计；对比了NB-IoT、Wi-Fi、LoRa、蓝牙、4G/5G各项网络的优势。NB-IoT在农业场景下，费用经济性、信号覆盖度、易用性皆有优势。分析了兔舍内目标监测环境因子，并根据兔的饲养环境标准与兔舍环境精度需求进行了传感器选型；根据实地需求完成了监测系统的组装与搭建。

（2）系统从设计初期便考虑了投产成本，针对兔舍监测实际需求挑选硬件与选取技术。选用云平台作为用户端，节约了使用树莓派等上位计算机的成本；采集端使用性价比高的半导体传感器，能够完成阈值范围判断的精确度要求不高的监测任务；NB-IoT因为独立插卡上网，节省了网关、设备、布线费用且年费极低。整套系统造价不超过400元，在低成本的同时兼具易操作、低能耗的优势。

（3）在山东青岛市郊兔厂实际网络测试中，每小时平均TPS为0.57，每分钟上报数据浮动1条，传输稳定可靠。整体设备NB-IoT模块功率在5.3 W，每日用电0.127度，虽大于使用ESP8266模

块的Wi-Fi网络设备的4.8 W，但是NB-IoT网络收发信息环节并没有产生额外功率，主要原因是模块射频功率大或未进入PSM模式导致的。设备网络稳定性、功率整体符合设计需求。在空舍环境监测测试24小时中，温度处于22～24 ℃；湿度上下波动10%；CO_2浓度处于420～440 ppm；日光灯亮灭导致传感器电压差约为2.6 V；声音较为安静，没有检测到超过40 dB的声音；MQ136和MQ137的比值V/V0在1附近，空气环境较为恒定。

本研究验证了NB-IoT网络监测设备在兔舍的适用性，在低成本条件下利用NB-IoT网络完成了兔舍环境数字化监测任务，总体可靠稳定。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 武玉燕. 仔兔培育的关键技术[J]. 吉林畜牧兽医, 2022, 43(10): 59-60.
WU Y Y. Key techniques for breeding young rabbits[J]. Jilin animal husbandry and veterinary medicine, 2022, 43(10): 59-60.

[2] 杨观止, 陈鹏飞, 崔新凯, 等. NB-IoT综述及性能测试[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 1-14.
YANG G Z, CHEN P F, CUI X K, et al. Overview and performance test of NB-IoT[J]. Computer engineering, 2020, 46(1): 1-14.

[3] YE H T, YANG Y J, ZHU L Y. A wireless network detection and control system for intelligent agricultural greenhouses based on NB-IOT technology[J]. Journal of physics: Conference series, 2021, 1738(1): ID 012058.

[4] FENG X, YAN F, LIU X Y. Study of wireless communication technologies on Internet of Things for precision agriculture[J]. Wireless personal communications, 2019, 108(3): 1785-1802.

[5] LIOPA-TSAKALIDI A, THOMOPOULOS V, BAROUCHAS P, et al. A NB-IoT based platform for smart irrigation in vineyard[C]// 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-4.

[6] 刘振语. 基于NB-IoT物联网的温室监控系统的设计与实现[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
LIU Z Y. Design and implementation of greenhouse monitoring system based on NB-IoT Internet of Things[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.

[7] MEZEI I, LUKIC M, BERBAKOV L, et al. Grapevine downy mildew warning system based on NB-IoT and energy harvesting technology[J]. Electronics, 2022, 11(3): ID 356.

[8] 张净, 姚森耀, 刘晓梅. 基于NB-IoT的水培智能监控系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(5): 175-181.
ZHANG J, YAO S Y, LIU X M. Design and experiment of hydroponic intelligent monitoring systems based on NB-IoT[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(5): 175-181.

[9] HUAN J, LI H, WU F, et al. Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT[J]. Aquacultural engineering, 2020, 90: ID 102088.

[10] 梁裕巧, 李洪兵, 罗洋, 等. 基于NB-IoT的花椒生长环境因子监测系统[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 166-173.
LIANG Y Q, LI H B, LUO Y, et al. Monitoring system for the growth environmental factors of *Zanthoxylum bungeanum* based on NB-IoT[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(6): 166-173.

[11] POPLI S, JHA R K, JAIN S. Adaptive small cell position algorithm (*ASPA*) for green farming using NB-IoT[J]. Journal of network and computer applications, 2021, 173: ID 102841.

[12] 聂珲, 陈海峰. 基于NB-IoT环境监测的多传感器数据融合技术[J]. 传感技术学报, 2020, 33(1): 144-152.
NIE H, CHEN H F. Multi-sensor data fusion technology based on NB-IoT environment monitoring[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2020, 33(1): 144-152.

[13] 冯云. 兔饲养管理措施及饲养环境调节与控制[J]. 中国动物保健, 2021, 23(5): 97-98.

[14] BODNÁR K, BODNÁR G, MAKRA L, et al. Technical note. Improving the microclimate of a rabbit house: Thermal insulation and air handling[J]. World rabbit science, 2019, 27(1): 49-55.

[15] 徐辰义, 李琳, 何剑斌. 热应激对兔影响及其防制措施[J]. 现代畜牧兽医, 2010(12): 46-48.
XU C Y, LI L, HE J B. Effect of heat stress on rabbits and its control measure[J]. Modern journal of animal husbandry and veterinary medicine, 2010(12): 46-48.

[16] SZENDRŐ Z, GERENCSÉR Z, MCNITT J I, et al. Effect of lighting on rabbits and its role in rabbit production: A review[J]. Livestock science, 2016, 183: 12-18.

[17] BALAMURUGAN C R, SATHEESH R. Development of raspberry Pi and IoT based monitoring and controlling devices for agriculture[J]. Journal of social, technological and environmental science, 2017, 6(2): 207-215.

[18] VINEELA T, NAGAHARINI J, KIRANMAI C, et al. IoT based agriculture monitoring and smart irrigation system using raspberry Pi[J]. International research journal of engineering and technology, 2018, 5(1): 1417-1420.

[19] BOOBALAN J, JACINTHA V, NAGARAJAN J, et al. An IOT based agriculture monitoring system[C]// 2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 594-598.

[20] CORDOVA-HUAMAN A V, JAUJA-CCANA V R, LA

ROSA-TORO A. Low-cost smartphone-controlled potentiostat based on Arduino for teaching electrochemistry fundamentals and applications[J]. Heliyon, 2021, 7(2): ID e06259.

[21] 姜晟, 陈英豪, 孙宝丽, 等. 基于物联网的集约化兔场环境监测系统[J]. 农业网络信息, 2014(12): 38-42.
JIANG S, CHEN Y H, SUN B L, et al. Design of intensive rabbit farm's environmental monitoring system based on Internet of Things[J]. Agriculture network information, 2014(12): 38-42.

[22] YANG J J, DONG B B, WANG Z H, et al. Research on the rabbit farm environmental monitoring and early warning system based on the Internet of Things[J]. Journal of computational and theoretical nanoscience, 2016, 13(9): 5964-5970.

[23] 冀荣华, 李豹, 陈振海, 等. 基于模糊推理的多因素兔舍环境调控方法研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 361-365.
JI R H, LI B, CHEN Z H, et al. Regulation model of rabbit house environment based on fuzzy reasoning[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(S1): 361-365.

Real-Time Monitoring System for Rabbit House Environment Based on NB-IoT Network

QIN Yingdong[1,2], JIA Wenshen[2*]

（1. *College of Computer and Information Engineering*, *Beijing University of Agriculture*, *Beijing* 102206, *China*; 2. *Institute of Quality Standard and Testing Technology*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*）

Abstract: To meet the needs of environmental monitoring and regulation in rabbit houses, a real-time environmental monitoring system for rabbit houses was proposed based on narrow band Internet of Things (NB-IoT). The system overcomes the limitations of traditional wired networks, reduces network costs, circuit components, and expenses is low. An Arduino development board and the Quectel BC260Y-NB-IoT network module were used, along with the message queuing telemetry transport (MQTT) protocol for remote telemetry transmission, which enables network connectivity and communication with an IoT cloud platform. Multiple sensors, including SGP30, MQ137, and 5516 photoresistors, were integrated into the system to achieve real-time monitoring of various environmental parameters within the rabbit house, such as sound decibels, light intensity, humidity, temperature, and gas concentrations. The collected data was stored for further analysis and could be used to inform environmental regulation and monitoring in rabbit houses, both locally and in the cloud. Signal alerts based on circuit principles were triggered when thresholds were exceeded, creating an optimal living environment for the rabbits. The advantages of NB-IoT networks and other networks, such as Wi-Fi and LoRa were compared. The technology and process of building a system based on the three-layer architecture of the Internet of Things was introduced. The prices of circuit components were analyzed, and the total cost of the entire system was less than 400 RMB. The system underwent network and energy consumption tests, and the transmission stability, reliability, and energy consumption were reasonable and consistent across different time periods, locations, and network connection methods. An average of 0.57 transactions per second (TPS) was processed by the NB-IoT network using the MQTT communication protocol, and 34.2 messages per minute were sent and received with a fluctuation of 1 message. The monitored device was found to have an average voltage of approximately 12.5 V, a current of approximately 0.42 A, and an average power of 5.3 W after continuous monitoring using an electricity meter. No additional power consumption was observed during communication. The performance of various sensors was tested through a 24-hour indoor test, during which temperature and lighting conditions showed different variations corresponding to day and night cycles. The readings were stably and accurately captured by the environmental sensors, demonstrating their suitability for long-term monitoring purposes. This system is can provide equipment cost and network selection reference values for remote or large-scale livestock monitoring devices.

Key words: NB - IoT; rabbit house; environmental monitoring; digital agriculture; low cost; Internet of Things; Arduino; MQTT